

УДК 621.74 + 583.3

Оптимизация процесса восстановления продуктов эрозии,  
полученных после электроэрозионной обработки никелевых сплавов.  
*Optimization of reduction process of erosion production formed nickel alloys  
electroarcing.*

Демин Д.А., Горбенко В.В., Винник И.А.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт».

*Представлена математическая модель процесса восстановления отходов, содержащих никель, полученных после электроэрозионной обработки сплавов. Рассмотрены явления происходящие при данной обработке и физические характеристики отходов - продуктов эрозии. Установлены оптимальные условия проведения процесса, при которых достигается высокий выход металлической основы.*

*The mathematical model of reduction process of nickel containing waste formed after alloys electroarcing is proposed. Physical effects taking place during this processing and characteristics of wastes as erosion products are considered. Optimal conditions for this process in order to receive high yield of metallic base are determined.*

На предприятиях машиностроительного комплекса ряд технологий предусматривает изготовление ответственных деталей сложной конфигурации. Заготовки таких деталей выполнены из высоколегированных сталей. Достаточно часто применяют никельсодержащие сплавы. При обработке полостей ковочных, вырубных, формовочных и других штампов, пресс-форм, литейных форм, высадочного и фасонного металлорежущего инструмента, деталей топливной аппаратуры, газотурбинных двигателей, различных приборов и изделий применяют электроэрозионный метод. Этот метод основан на использовании преобразуемой в тепло энергии электрических разрядов, возбуждаемых между инструментом и заготовкой. В зависимости от вида электрического разряда (искры, дуги), параметров импульса тока, напряжения и других условий электроэрозионная обработка включает четыре основные разновидности: электроискровую, электроимпульсную, электроконтактную и анодно-механическую. Каждая из этих обработок отличается выходными технологическими характеристиками, оборудованием и имеет свою область промышленного применения. Однако, все разновидности электроэрозионной обработки металлов основаны на использовании явления электрической эрозии [1,2].

Проведение таких технологических процессов неизбежно приводит к образованию отходов, содержащих значительное количество легирующих элементов.

Поэтому, в настоящее время достаточно актуальной является проблема возврата в металлооборот этих элементов, получаемых при обработке электроэрозионным методом широкой номенклатуры деталей.

Представляло интерес изучение физических явлений, происходящих при данной обработке.

Специфику физических процессов определяет энергия  $W_{\text{и}}$  импульса тока, которая, распределяясь между анодом, катодом и столбом разряда, выделяется в течение весьма короткого времени при высоких плотностях. В результате происходит удаление металла с обрабатываемой заготовки, изменение структуры и свойств поверхностного слоя, изнашивание электрод-инструмента, разложение рабочей жидкости.

При прохождении искрового разряда между электродами материал с их поверхности удаляется в жидкой, парообразной и твердой фазах.

С уменьшением длительности импульса увеличивается количество материала, удаляемого в парообразном состоянии. Так, при использовании электрических импульсов с неизменной величиной энергии и длительностью 10 и 1000 мкс доля испаренного металла составляет в первом случае 60-70% от величины всего объема лунки, во втором 5%.

Рабочая жидкость, окружающая канал разряда, испаряется, образуя газовую полость. В начальный момент скорость движения границы газовой полости достигает 200 м/с, а давление в полости - сотен атмосфер. В результате обрабатываемый металл испытывает значительное механическое давление. После окончания импульса тока газовая полость продолжает по инерции расширяться. Одновременно происходит конденсация паров металла, которая приводит к быстрому падению давления в газовой полости, вплоть до давления ниже атмосферного. В момент, когда размеры этой полости приближаются к наибольшему, а давление в ней - к наименьшему значению, перегретый металл, который находится в образовавшейся лунке, вскипает. Происходит взрывное выбрасывание микрокапель расплава в окружающую среду. Реактивной струей паров металла, оставшийся в лунке жидкий металл выдавливается из нее, и застывая, образует валик [3,4].

В первый момент капли летят в облаке водяного пара, образованном электрическим разрядом, а затем и сами создают вокруг себя паровую рубашку.

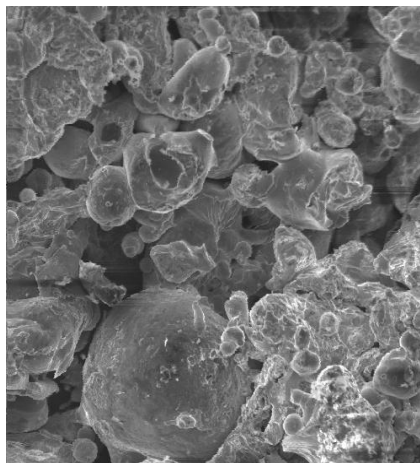
В водяном пару нагретый металл окисляется. Тончайшая пленка оксида покрывает всю поверхность частиц. При чем содержание оксидов в продуктах эрозии при разряде в воде имеется в основном в мельчайшей фракции ( $10^{-6}$  -  $10^{-5}$  см), а в крупной и средней фракциях количество оксидов находится на пределе чувствительности рентгенографического метода. Однако, при металлографических исследованиях наблюдается много точечных включений оксидной фазы. На содержание оксидов в продуктах эрозии указывают авторы работ [6,7,8]. Таким образом, оксидная фаза расположена в виде фрагментов оксидной оболочки на поверхности частиц и в виде точечных включений в материале частиц.

Количественное содержание оксидов зависит от свойств материала электродов и, в основном, от электрических параметров разряда. Так, например, процентное содержание

оксидов значительно повышается с увеличением длительности разряда при одной и той же энергии разряда.

Помимо оксидов в состав продуктов эрозии входят и твердые растворы металлов.

С помощью сканирующего микроскопа были исследованы размеры и формы поверхности средних и больших частиц продуктов эрозии (рис 1). Из рисунка можно видеть, что частицы располагаются в хаотичном порядке, покрыты оксидной пленкой, их форма близка к сферической.



**Рис.1.Снимок продуктов эрозии, полученных после электроэрозионной обработки никелевых сплавов (увеличение 200).**

Изучение возможности утилизации легирующих элементов из шламов, полученных электроэрозионным способом обработки деталей, изготовленных из никельсодержащих сплавов представляет большой научный и практический интерес.

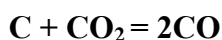
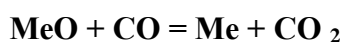
В Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» на кафедре «Охрана труда и окружающей среды» совместно с кафедрой «Литейного производства» изучена возможность утилизации никельсодержащих шламов одного из машиностроительных заводов г. Харькова.

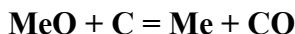
Учитывая состав продуктов эрозии, был предложен высокотемпературный процесс восстановления.

Для оптимизации процесса были изучены все необходимые для его проведения параметры: тип и количество восстановителя, температура, время и толщина слоя шлама.

Выбор восстановителя проводили с учетом сопоставления изобарных потенциалов для реакций восстановления. По расчетам выполненным по методу Владимирова, лучшей восстановительной способностью обладает оксид углерода [9]. Для создания данной восстановительной среды использовали твердый углерод. Роль его сводится к непрерывной регенерации оксида углерода [10].

Этот процесс может быть выражен следующими уравнениями:





Расход углерода изменялся от 1 до 10% мас.шихты.

При выборе температуры учитывали компоненты, составляющие продукты эрозии.

Для оксидов металлов, которые входят в исследуемые отходы достаточной температурой восстановления является  $t = 1300 - 1350^\circ\text{C}$ . Однако, в отходах присутствуют и твердые растворы, многие из которых содержат никель (до 60%), температура плавления которого составляет  $1454^\circ\text{C}$ . Поэтому эксперименты проводились в пределах  $1350 - 1500^\circ\text{C}$ .

На основании предварительных экспериментов время плавки было выбрано от 30 до 120 минут с интервалом в 30 минут. Плавка шлака производилась в корундовом тигле. Толщина слоя шлака варьировалась от 4 до 10 мм.

Эксперименты проводились в печи Таммана. При достижении заданной температуры вводили тигель с шихтой и выдерживали требуемое время. Затем тигель вынимали из печи и охлаждали в воздушной среде. После охлаждения металлическую основу отделяли от шлака вручную. С целью оптимизации процесса на основании полученных данных строилась математическая модель.

Построение математической модели производилось методом наименьших квадратов [11, 12].

В качестве независимых переменных выбраны: температура,  $^\circ\text{C}$  ( $x_1$ ), количество восстановителя, % ( $x_2$ ), толщина слоя, мм ( $x_3$ ). Общий вид модели - линейный:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3;$$

где  $a_i$  - оценки коэффициентов модели, рассчитываемые на основании реализации плана дробного факторного эксперимента  $2^{3-1}$ ;

$y$  - выход продукта реакции в течении, %.

Данные для моделирования приведены в таблице 1.

В каждой точке плана было проведено по 2 параллельных эксперимента.

Оценки коэффициентов рассчитаны по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j;$$

$$a_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{1j}y_j;$$

$$a_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{2j}y_j;$$

$$a_3 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{3j} y_j;$$

**Таблица 1. Результаты экспериментов.**

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y$ ( $\tau = 30$ мин)	$y$ ( $\tau = 60$ мин)	$y$ ( $\tau = 90$ мин)	$y$ ( $\tau = 120$ мин)
1350	1	10	17,2	22,4	18,2	16,4
1350	10	4	18,13	24,13	25,46	19,2
1500	1	4	55,67	53,33	49,13	48,33
1500	10	10	57,96	57,64	60,52	58,92

В результате получена модель, описывающая кинетику выхода продукта реакции в зависимости от входных параметров, представленных в нормированном виде.

$$y = 37,24 + 19,67x_1 + 0,84x_2 + 0,29x_3; (\tau = 30 \text{ мин})$$

$$y = 39,37 + 16,11x_1 + 1,51x_2 + 0,645x_3; (\tau = 60 \text{ мин})$$

$$y = 38,33 + 16,49x_1 + 4,66x_2 + 1,03x_3; (\tau = 90 \text{ мин})$$

$$y = 35,71 + 16,49x_1 + 3,35x_2 + 1,94x_3; (\tau = 120 \text{ мин})$$

Проверка значимости коэффициентов осуществлена в соответствии с  $t$  - критерием Стьюдента. Установлено, что значимыми являются коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$ . Это означает, что факторы  $x_2$  и  $x_3$  могут быть исключены из модели.

$$y = 37,24 + 19,67x_1; (\tau = 30 \text{ мин})$$

$$y = 39,37 + 16,11x_1; (\tau = 60 \text{ мин})$$

$$y = 38,33 + 16,49x_1; (\tau = 90 \text{ мин})$$

$$y = 35,71 + 16,49x_1; (\tau = 120 \text{ мин})$$

В таблице 2 приведены экспериментальные и расчетные значения выхода продукта реакции.

На основании этих данных с помощью  $F$  - критерия Фишера проверена адекватность модели: при надежности  $P = 0,95$  с числом степеней свободы  $\varphi_1 = 4$  для числителя и  $\varphi_2 = 8$  для знаменателя  $F_{кр} = 3,84$ . После подстановки соответствующих значений получаем  $F \leq F_{кр}$ .

**Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения выхода продукта реакции и значения  $F$ - критерия.**

$У_{экс}$ ( $\tau = 30$ )	$У_{теор}$	$У_{экс}$ ( $\tau = 60$ )	$У_{теор}$	$У_{экс}$ ( $\tau = 90$ )	$У_{теор}$	$У_{экс}$ ( $\tau = 120$ )	$У_{теор}$
17,2	17,66	22,4	23,26	18,2	21,83	16,4	17,8
18,3	17,66	24,13	23,26	25,46	21,83	19,2	17,8

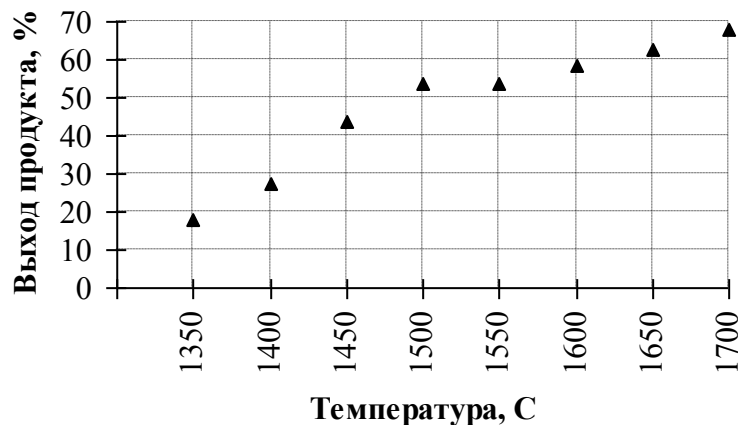
55,67	56,81	53,33	55,48	49,13	54,82	48,33	53,62
57,96	56,81	57,64	55,48	60,59	54,82	58,92	53,62
F = 0,319		F = 0,717		F = 1,061		F = 0,926	

Таким образом, полученная математическая модель адекватно описывает кинетику выхода продукта реакции в зависимости от температуры в выбранном диапазоне. По данным таблицы 2 время, при котором достигается максимальный выход продукта реакции составляет 60 минут.

Для расчета оптимальной температуры, обеспечивающей максимум выхода продукта реакции, был увеличен температурный диапазон до 1700°C (с шагом 50°C). Проведены эксперименты в соответствии с описанной методикой. В таблице 3 представлены полученные результаты.

**Таблица 3. Экспериментальные значения выхода продукта реакции.**

№п/п	Температура, °C	y	№п/п	Температура, °C	y
1.	1350	17,8	5.	1550	53,55
2.	1400	31,62	6.	1600	58,25
3.	1450	43,80	7.	1650	62,39
4.	1500	53,62	8.	1700	68,10



**Рис. 2. Зависимость выхода продукта реакции от температуры (экспериментальные данные).**

Распределение экспериментальных точек в выбранной области планирования (рис.2) показывает, что зависимость выхода продукта реакции от температуры может быть описана в экспоненциальной форме:

$$A = a_0 - \exp(-a_1 T),$$

$$\text{где } y = 1 - \frac{1}{e^A};$$

y - выход продукта реакции, %;

$a_0, a_1$  - оценки коэффициентов модели;

$T$  - температура проведения процесса, °C.

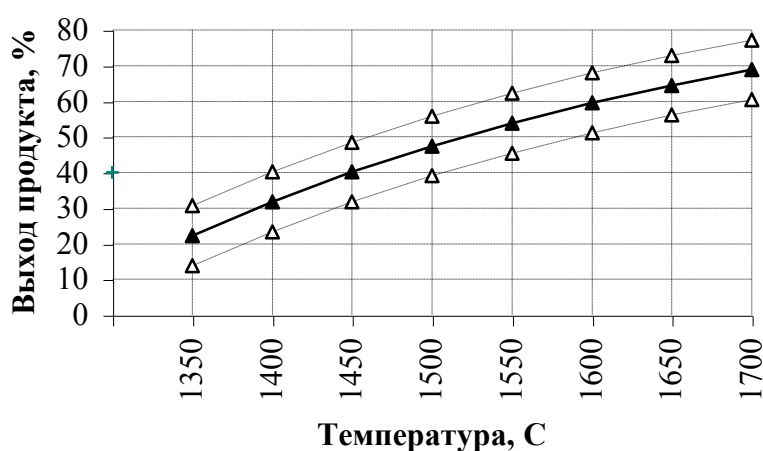
Полученная модель имеет вид:

$$A = -3,272 + 2,61 \cdot 10^{-3}T$$

В таблице 4 приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных, даны значения доверительного интервала.

**Таблица 4. Теоретические и экспериментальные значения продукта реакции.**

Температура, °C	$Y_{\text{теор}}$	$Y_{\text{эксп}}$	$(y_{\text{теор}} \pm \frac{t_{\text{кр}} S}{\sqrt{N}})$
1350	22,4	17,8	13,84 - 30,64
1400	36,6	31,62	23,35 - 40,15
1450	41,3	43,80	31,70 - 48,50
1500	47,5	53,63	39,02 - 55,82
1550	54,0	53,55	45,46 - 62,26
1600	59,6	58,25	51,10 - 67,90
1650	64,46	62,39	56,06 - 72,86
1700	68,9	68,1	60,40 - 77,20



**Рис. 3. Зависимость выхода продукта реакции от температуры (расчетные данные).**

На рис. 3 показана зависимость выхода продукта реакции от температуры на основании модели, показаны также границы доверительного интервала.

Математическая модель, описывающая кинетику выхода продукта реакции, позволила определить оптимальные условия получения восстановленной металлической основы. Такая основа представляет собой сплав, содержащий в основном Ni (54 - 64%), а также Cr (11 - 15%), Mo (3 - 7%), W (2 - 4%) и в малых количествах Co, Ti, Fe. Данный сплав может быть использован в качестве легирующей добавки.

**Список литературы.**

1. *Фотеев Н.К.* Технология электроэрозионной обработки.-М.: Машиностроение, 1980.- 184с.
2. *Лившиц А.Л. и др.* Электроимпульсная обработка металлов.- М: Машиностроение, 1967.- 295с.
3. *Золотых Б.Н.* Основные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Автореф. диссер. на соискание ученой степени д-ра технич. наук. М.: МИЭМ, 1968.
4. *Золотых Б.Н. , Мельбер Р.Р.* Физические основы электроэрозионной обработки. М., 1977.
5. *Фоминский Л.П., Левчук М.В., Мюллер А.С.* Особенности порошка, получаемого электроэрозионным диспергированием чугуна в воде. //Электронная обработка материалов. 1986. №3. С 11-14.
6. *Фоминский Л.П., Левчук М.В., Мюллер А.С.* Фазовый состав, структура и окисляемость порошков, получаемых электроэрозионным диспергированием железа и углеродистых сталей в воде. - В кн.: Электрофизические и электрохимические методы обработки. Вып 9. М.: НИИМаш., 1983.
7. *Намитоков К.К.* Электроэрозионные явления. М., «Энергия», 1978.- 456с.
8. *Красюк Б.А.* Исследование порошков - продуктов эрозии электроискровой обработки. - В кн.: Электроискровая обработка металлов. М., Изд-во АН СССР, 1963. - с. 126-133.
9. *Владимиров Л.П.* Термодинамические расчеты равновесия металлургических реакций. - М.: Металлургия, 1970. -528с.
10. *Гельд В.П., Есин О.А.* Процессы высокотемпературного восстановления. Свердловск: . Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1957. - 646с.
11. *Хартман К.* Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. - М.: Мир, 1977. - 447с.
12. Основы научных исследований.: Учебник / Под. ред. В.И. Крутова и др. - М.: Высш.шк. 1989.- 400с.